

# 核热电站热力系统设计初探

罗春新 王岱祥 林志鸿

## 〔提 要〕

核热电站的热力系统设计是建设核热电站工程的重要一环。本文对核热电站热力系统的设计原则和特点,结合金山核热电站热力系统的方案设计作了初步探讨。

主题词: 热力系统 核电站

## 一、前 言

核热电站是近十年来新兴的动力工程之一,它利用原子反应堆的高密集能量为各种工业企业的生产提供必需的工业用汽,生活用汽和部分电能,对于生产过程中需要大量蒸汽和电力的生产单位(例如化工联合企业),建设中、小型核热电站具有广阔的前景。

## 二、核热电站热力系统的设计原则

与所有电站热力系统一样,核热电站的热力系统必须保证长期安全、可靠地运行,同时要有良好的经济指标和简单的系统结构。此外,核热电站因以供热为主,“以汽定电”首先应满足热用户的用热要求,剩余蒸汽再用于发电,因此,它必须适应热负荷的变化,保证工作的连续和稳定。最后还应确保能防止放射性扩散,避免发生核污染。

整个核热电站的热力系统设计必须遵循上述主要原则。一般讲,核热电站可以利用成熟的原子反应堆技术和常规电站的丰富经验来实现热电联供,只要正确地协调这些原则,就能设计出经济指标较先进的核热电站热力系统。

## 三、核热电站热力系统的特点

与常规电站相比,核热电站的热力系统具有以下特点:

### 1. 必须配置三个回路

核热电站以核反应堆产生的热来生产蒸汽,一旦热交换器出现漏泄,二回路产生的蒸汽将受到放射性污染而不能直接供给热用户使用。为了确保安全,生产过程用汽和日常生活用汽必须通过设置第三回路来提供。这里,第二回路起隔离作用。为了防止二、三回路热交换

过程出现漏泄导致第三回路的放射性污染,则要求第三回路侧的汽水压力比第二回路的汽水压力高。显然,回路的增加将使热力系统变得复杂,并引出一些新要求。

## 2. 必须按两个基本工况进行综合设计

核热电站以供热为主,而用户的用汽量是随季节的变化而改变的。因此,整个热力系统及其配置的汽轮发电机组应同时兼顾两个基本工况,即供热最多的冬季工况和发电最多的夏季工况进行综合设计。对热力系统而言,冬季工况是主要的;对汽轮机组则应按夏季工况进行设计,以确定各级通流尺寸和相应的热力参数,然后再按其变工况特性确定冬季工况下汽轮机各段的热力性能,并以此协调各设备间的匹配关系。为此,在方案设计阶段就必须根据汽轮机组的变工况计算结果对热力系统作反复计算,并对所有相关的设备进行综合设计。

## 3. 采用调整抽汽式饱和蒸汽轮机

当采用压水堆时,其产生的蒸汽大多是饱和蒸汽,因此,核热电站汽轮机组具有饱和蒸汽轮机的各种特点。为了兼顾以发电最多的工况进行设计又要适应热力系统以供热为主的原则,介于核岛一回路和供热三回路之间的汽轮机组应同时协调来自核、电两方面的要求。这必然使核热电站汽轮机组的设计比常规电站汽轮机组困难而复杂一些。此外,因三回路采用的是调整抽汽,其总抽汽量比例也比常规电站的大,因此汽轮机调节系统设计必须同时满足一回路、汽轮机本身特性和三回路的用热要求。

## 4. 系统给水的全流量除盐和除氧

合理的给水处理,使热力系统中的汽水品质符合规范确认的指标,不仅可改善蒸汽发生器的热工水力工况和防止系统各主要部件的腐蚀,还可以减少电站运行费用和投资。因此,系统中给水的除盐、除氧极其重要。为了保证在任何情况下给水都具有较佳的理化性能,除各部件选用合适的材料和合理的结构以提高冷凝器的水密性和汽轮机组等的汽密性外,核热电站热力系统中还需考虑全流量除盐、除氧。为此,将使热力系统变得复杂、投资增加、经济性下降。

## 5. 尺寸特性

由于其工质为饱和蒸汽、总焓降小,与相同功率的常规电站相比,核热电站的蒸汽量要大得多,因此,无论是汽轮机、还是各汽水管道的尺寸,乃至机房的空间和辅助设备的重量均有较大的增加。

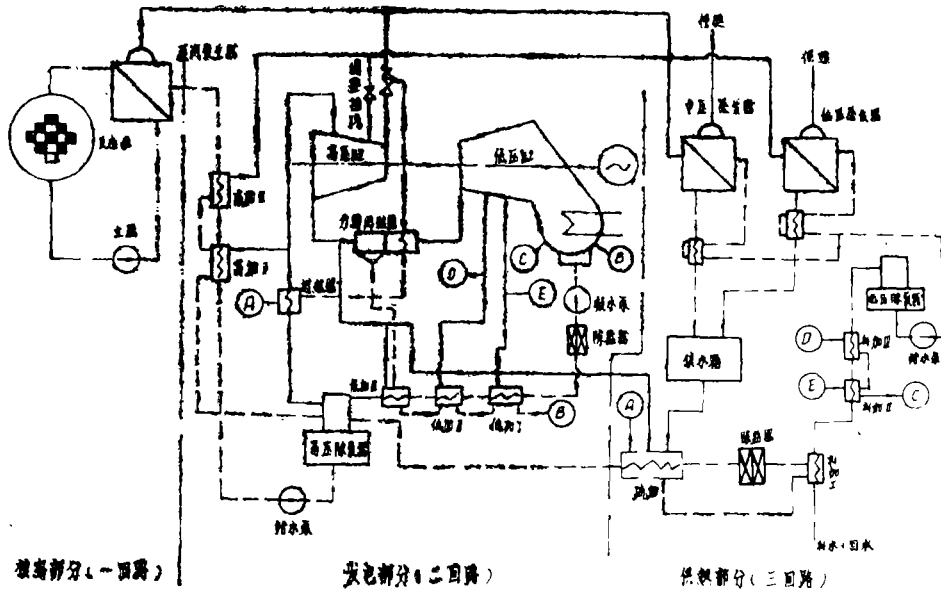
# 四、核热电站的原则性热力系统

目前,国外只有少数几个技术发达的国家正在研究开发核热电站。我国有发展核热电站的巨大潜力,但由于财力所限,加之还有些技术问题需要研究解决,目前只能在个别条件较好的地区和企业建造这种电站。上海石化总厂的金山核热电站即是拟建中的一个。下图为该电站热力系统的简化原理图。整个系统由三部分组成:核岛部分(一回路)、发电部分(二回路)和供热部分(三回路)。下面结合该系统方案设计中涉及的若干问题作一简要的探讨。

## 1. 核岛部分(一回路)

包括反应堆、蒸汽发生器和主泵等的整个一回路系统都放在一个大压力壳内。反应堆功率为450MW。为了提高电站的可用率、减少设备故障引起的对核岛部分的限制、要求常规设备留有较大的安全裕量。通常,核热电站的安全裕量比常规电站的大,并且要求在系统

核热电站简化热力系统图



核热电站热力系统原理图

和设备设计时, 应尽可能综合考虑系统的简化和设备的可靠性。

## 2. 发电部分(二回路)

发电部分(二回路)主要由汽轮发电机组、冷凝水泵、除盐设备、给水加热器、除氧器和给水泵等组成。其功用是通过汽轮机组对整个热力系统的热力负荷起协调作用、同时隔离一、三回路以避免放射性对三回路的污染。

### (1) 蒸汽发生器给水温度

对一定的热力系统存在一个最佳给水温度。方案设计时, 通常是参照现有压水堆核电站的给水温度, 结合具体情况计算比较来选取的。国外压水堆核电站的给水温度如下: 美国西屋公司为 $170\sim 215\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、苏联哈尔科夫汽轮机厂为 $192\sim 223\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、西德动力联合公司为 $200\sim 210\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、布朗·布维尔公司为 $215\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

金山核热电站选为 $205\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。为了满足用户提出的给水温度为定值的要求, 最后一级高加的合适加热汽源, 只能设在调整抽汽处。当调整抽汽压力确定为 $24\pm 1\text{ ata}$ 时, 给水温度最高不能超过 $208\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。选得过低会使最后一级高加的端差过大。给水温度的选择应同时兼顾高加的级数和系统在冬、夏工况热负荷变化时加热器焓升的合理性。

### (2) 除氧器运行方式的选择

除氧器可以设计成各种方式运行, 国内习惯用以过热蒸汽作汽源的定压运行方式, 也可采用滑压运行和冷凝器真空除氧。鉴于真空除氧比较复杂, 国外也属少见, 而滑压除氧国内的运行经验较少。因此, 对水质要求较多的核热电站, 采用过热蒸汽定压除氧方式是稳妥的。国内高压定压除氧器压力为 $3.6\sim 6\text{ ata}$ 。考虑到本核电站在反应堆非满功率运行的冬季工况下, 即使维持 $3.6\text{ ata}$ 除氧也有困难, 故取高压缸的湿蒸汽作除氧汽源把再热器的高温凝水加热成具有 $32\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右过热度的过热蒸汽。虽然直接用湿蒸汽作除氧汽源也可以达到同样的目的,

国外都是如此,但国内尚需研制。显然,核热电站以湿蒸汽做除氧汽源较便于安排,即减轻分离再热器的负担、高、低加配置也较合理。因此,研制以湿蒸汽为汽源的除氧器是有意义的。

### (3) 加热器的端差

加热器的端差对系统热效率有一定影响。按国内规范推荐,以湿蒸汽为汽源的加热器的端差为 $3\sim 6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。但核热电站受具体条件制约,不可能按规范选择。因为最后一级高加的汽源调整抽汽参数已定。给水温度一旦选定,加热器的端差则随之确定。最后一级低加端差的确定,应综合考虑所能接受的温升、进除氧器的凝水温度以及加热汽源的选择等。否则,结构设计不合理。在金山核热电站热力系统中,末级高加的端差选为 $6\sim 17.56\text{ }^{\circ}\text{C}$ (对应于抽汽压力 $(24\pm 1)\text{ata}$ ),最后一级低加的端差为 $16\sim 21.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ (分别对应冬、夏二工况)。此不合适的端差是由于定压除氧和给水温度恒定所致。

### (4) 回热加热级数的选择

增加回热加热级数虽可提高系统热效率,但受结构能否实现和电站综合经济性的限制。核热电站中更是如此。本核热电站除氧压力定为 $6\text{ata}$ ,在此情况下,用一级高加使给水温度达到 $205\text{ }^{\circ}\text{C}$ 显然不合理。汽轮机高压缸结构较复杂,调整抽汽后面在高压缸最多只能布置一个抽汽点,采用三级高加在结构上难于实现。低压缸抽汽量较多、容积流量大、管道口径也大。但因结构限制、低压缸也难于安排更多级数的回热抽汽。本核热电站采用2级高加+1级除氧+3级低加,且低加III的汽源取自高压缸排汽管中,结构简单、布置合理。

### (5) 汽轮机的设计

金山核热电站的汽轮机额定功率为 $65\text{MW}$ (单流),但其排汽尺寸与双流 $200\text{MW}$ 的常规电站机组相当。本核热电站仅调整抽汽在冬季工况时就达到汽机进汽量的 $58.5\%$ 左右,加上其他各种抽汽,汽机对冷凝器的排汽量仅为汽机总进汽量的 $17\%$ 左右。随着工况的变化,调整抽汽的汽量变化也较大。因此,汽量调节的范围宽,配汽方式的选用对经济性的影响较大。计算表明,在冬季工况,喷嘴调节可比节流调节配汽得益 $2300\text{kW}$ 的电力,而夏季工况仅比节流调节配汽少发电 $198\text{kW}$ 。

### (6) 汽轮机排汽背压

排汽背压是热力系统中汽轮机方案设计的重要参数,它的选择是汽轮机长叶片流通能力、循环水冷却温度、冷凝器所需冷却面积、水泵耗电以及汽轮机的结构型式等因素综合考虑的结果。由于本核电站采用海水冷却,夏季温度可达 $31\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,对于钛制冷凝器来说,背压选取恰当与否,使得设备投资费相差极为悬殊。考虑全年的冷却水温度变化,为使设备能充分发挥其工作能力,需要进行投资回收费、水泵耗电费、设备维修费、汽机功率微增的得益、冷凝器年运行费用等的综合技术经济论证,以选取汽轮机的排汽背压。

### (7) 中、低压蒸发器加热蒸汽凝水的处理

三回路中、低压蒸发器的加热蒸汽来自二回路系统。加热后的蒸汽凝水全部除盐后,送入高压除氧器除氧。由于除盐设备不能接受高温热器,则先将凝水引入集水箱,作为疏水加热器和补水加热器的热源。通过热交换温度降低后送入除盐装置进行除盐,然后再送入疏水加热器,使其升温后送入除氧器除氧。通过以上处理,使热力系统满足了全流量除盐和除氧的要求。实际运行中,在正常情况下二回路供热部分的凝水除盐的必要性及其除盐方式有待于实践的检查 and 经验的积累。

## 3. 供热部分(三回路)

第三回路主要由中、低压蒸发器,回热加热器、低压除氧器、补水加热器、除盐装置、对外供热管网及其设备等组成。低压除氧器担负对补水和供热回水进行除氧。对外供热蒸汽的参数由用户的需要确定,其蒸发器的加热汽源来自系统二回路。中压蒸发器的加热蒸汽取自蒸汽发生器后的主蒸汽管道。低压蒸发器的加热蒸汽的汽轮机的调整抽汽。调整抽汽参数的确定必须考虑低压蒸发器设计中必要的传热端差。在此前提下,调整抽汽参数选择应尽可能低,这对汽轮机设计的安全可靠和投资的回收都是有利的。

一般说来,三回路的设备大多为常规设备,无特殊要求。中、低压蒸发器由于采用蒸汽加热,其内部存在两相流动的问题。对此,国内外都已作过各种研究,但目前仍是一个值得重视的课题。

采用蒸汽对外供热,蒸发器尺寸大,台数也较多,其投资较大。与对外供热水相比,其水质要求也较高。

## 结 束 语

核电站服务的对象是需要大量用热用电的有一定规模的联合企业。其特点是“供热为主,余热发电”,其热力系统必须以三个回路来进行设计。系统中所有各部套及热力参数的选择,必须满足核电站热力系统的特性要求。由于国内刚开始起步,研究课题有待开展,热力系统设计中的问题、今后有进一步探索的必要。

## 参 考 文 献

- (1) 703研究所: HC56—47.5/24型汽轮机方案设计说明书(1984年8月)
- (2) 阿尔斯通·大西洋公司: 法国核能工业技术周(1983年10月)
- (3) 张贵勤: 压水堆蒸汽发生器二次水处理及其水质指标. (“核动力工程”1984.5)
- (4) 重庆大学: 热力发电厂(电力出版社)
- (5) 美国MID/AND电厂部分复印资料(1983)